

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Návrh kompozitních hnacích hřídelů vozidla Formula Student

Design of Composite Drive Shafts of
Formula Student

Student:

Dávid Srníček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Hapla

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Dávid Srníček**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R010 Konstrukce strojů a zařízení**
Specializace: **21 Konstrukce výrobních strojů a zařízení**
Téma: **Návrh kompozitních hnacích hřídelů vozidla Formula Student**
Design of Composite Drive Shafts of Formula Student
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce navrhnete a podrobně zpracujete konstrukční řešení hnacích hřídelů pro závodní vůz.

Zpracujte:

1. úvod do problematiky,
2. konstrukci hnacích hřídelů,
3. výpočet hnacího momentu působícího na vozidle,
4. porovnání variant spojů a výběr optimální varianty,
5. výběr karbonové trubky a určení tloušťky stěny,
6. návrh lepeného spoje,
7. zhodnocení dosažených výsledků.

Zadané parametry:

krouticí moment na klikové hřídeli $M_k = 58 \text{ Nm}$

Maximální výkon $P = 60 \text{ kW}$

Převodový poměr $i_p = 1,955$.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

KALÁB Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: části spojovací*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, 90 s. ISBN 978-80-248-1290-8

NĚMČEK, Miloš. *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů: spoje*. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 2008, 111 s. ISBN 978-80-248-1782-8

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Úvaly: Albra, 2003, 888 s. ISBN 80-86490-74-2

VLK, František. *Převody motorových vozidel*. Brno: Vlk, 2006. ISBN 80-239-6463-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Hapla**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Pan
Dávid Srníček
nar. 16. 8. 1998
Nová Bystrica 674
023 05 Vychylovka



datum: 17. 2. 2020

vyřizuje: Ivana Sikorová DiS., tel.: 597 324 122, email: ivana.sikorova@vsb.cz

Povolení vypracovat bakalářskou práci ve slovenském jazyce

Na základě Vaší žádosti ze dne 12. 2. 2020 Vám povoluji vypracovat Vaši bakalářskou práci ve slovenském jazyce.

S pozdravem


VYSOKÁ ŠKOLA BÁNSKÁ
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta strojní
17. února 2020
7015 (A) Ostrava-Poruba

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan Fakulty strojní

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18.května. 2020



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.května.2020

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Dávid Srníček

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vychylovka 674

02305 Nová Bystrica

Slovensko

ANOTÁCIA BAKALÁRSKEJ PRÁCE

SRNÍČEK, D. *Návrh kompozitních hnacích hřídelů vozidla Formula Student*. Ostrava, 2020. Bakalárska práca. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Vedúci práce Ing. Tomáš Hapla.

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom kompozitných hriadeľov vozidla Formula Student. V úvode je opísaná súťaž Formula Student a následne teoretický úvod do konštrukcie a do problematiky konštrukcie hnacích hriadeľov. V ďalšej časti sa zaoberá návrhom a výrobou kompozitnej rúrky, lepidla a návrhom lepeného spoja, návrhom a výberom vhodného variantu oceľovej tripoidnej koncovky. Tretia časť práce sa zaoberá FEM analýzou danej koncovky a v poslednej časti je popísané statické meranie danej sústavy kompozitnej rúrky a lepidla.

Klíúčové slová:

Hnací hriadeľ, kompozit, lepený spoj, uhlíkové vlákno, tripod

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SRNICEK, D. *Design of Composite Drive Shafts of Formula Student*. Ostrava, 2020. Bachelor thesis. VSB-Technical university of Ostrava. Thesis head: Ing. Tomas Hapla.

The bachelor thesis deals with the design of composite drive shafts of formula student car. At the beginning of this work is an introduction into the formula student competition and theoretical analysis of driving axle construction. In the next part, the work describe design and manufacture of composite tube, glued joint and calculating of it, designing and selection of a suitable variant for steel tripod. Third part describe FEM of steel part and the end of the work describe testing of systems of components such as glued joint and composite axle.

Keywords:

Drive shafts, composite, glued joint, carbon fiber, tripod

Pod'akovanie

Vrelé pod'akovanie patrí môjmu vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Tomášovi Haplovi za jeho priateľský prístup, odbornú pomoc a cenné rady pri tvorbe práce. Ďalej moje pod'akovanie patrí aj firme Brebeck Composite s.r.o a celému jej kolektívu za nesmiernu pomoc pri návrhu a výrobe kompozitnej rúrky.

Obsah

Úvod	12
1 Formula Student.....	13
1.1 Disciplíny Formula SAE/Student	14
2 Hnacie hriadele	15
2.1 Dôležité kritéria hnacích hriadeľov.....	16
2.2 Materiály hnacích hriadeľov	17
2.3 Hnacie kĺby.....	19
3 Konštrukčné riešenie hnacích hriadeľov.....	21
4 Výpočet momentov pôsobiacich na hriadeľ	22
4.1 Výpočet krútiaceho momentu od motora.....	22
4.2 Výpočet brzdného momentu	22
4.3 Výpočet maximálneho momentu preneseného pneumatikou	24
5. Kompozitná rúrka.....	26
5.1 Návrh a výroba kompozitnej rúrky	26
6 Návrh lepeného spoja	33
6.1 Návrh dĺžky lepeného spoja	35
7 Návrh hnacieho kĺbu	37
7.1 Výber optimálneho variantu	39
8 FEM analýza zvoleného hnacieho kĺbu	40
9 Návrh testovacieho prípravku, statická skúška.....	44
10 Manžety.....	46
Zhodnotenie výsledkov	47
Literatúra.....	49

Zoznam použitých skratiek a symbolov

Značka	Význam	Jednotka
μ	Trecí koeficient (vozovka – pneumatika)	[-]
a_{long}	Maximálne pozdĺžne zrýchlenie vozidla	[m·s ⁻²]
d	Priemer valcovej časti tripodu	[mm]
D	Vnútorý priemer rúrky	[mm]
d'	Vnútorý priemer hriadeľa	[m]
D'	Vonkajší priemer hriadeľa	[m]
D_0	Priemer formy kruhového prierezu pri 25°C	[m]
D_{-15}	Priemer formy kruhového prierezu pri - 15°C	[m]
F_{ax1}	Reakcia pri zrýchlení v osi X prednej nápravy	[N]
F_{ax2}	Reakcia pri zrýchlení v osi X zadnej nápravy	[N]
F_{az1}	Reakcia pri zrýchlení v osi Z prednej nápravy	[N]
F_{az2}	Reakcia pri zrýchlení v osi Z zadnej nápravy	[N]
F_{bx1}	Brzdna reakcia v osi X prednej nápravy	[N]
F_{bx2}	Brzdna reakcia v osi X zadnej nápravy	[N]
F_{bz1}	Brzdna reakcia v osi Z prednej nápravy	[N]
F_{bz2}	Brzdna reakcia v osi Z zadnej nápravy	[N]
F_{set}	Zotrvačná sila	[N]
g	Gravitačná konštanta	[m·s ⁻²]
G	Tiažová sila vozidla	[N]
h_t	Výška ťažiska	[mm]
i_1	Prevodový pomer 1. stupeň	[-]
i_{MAX}	Maximálny celkový prevodový pomer	[-]
i_p	Primárny prevodový pomer	[-]
i_s	Sekundárny prevodový pomer	[-]
k	Bezpečnosť lepeného spoja	[-]
l'	Dĺžka hriadeľa	[m]
l	Činná dĺžka lepidla	[mm]
L	Rázvor	[mm]
L_1	Vzdialenosť ťažiska od prednej nápravy	[mm]
L_2	Vzdialenosť ťažiska od zadnej nápravy	[mm]
M_a	Moment prenesený pneumatikou pri zrýchlení	[Nm]
M_b	Brzdny moment na jednej hriadeli	[Nm]
m_{cel}	Celková hmotnosť	[kg]

M_k	Točivý moment na kľukovom hriadeľi	[Nm]
M_k'	Točivý moment	[Nm]
$M_{kl\ max}$	Maximálny moment prenesený lepidlom	[Nm]
m_p	Hmotnosť pilota	[kg]
M_v	Výstupný krútiaci moment na diferenciály	[Nm]
m_{voz}	Hmotnosť vozidla	[kg]
M_{vp}	Moment na jednej hriadeľi	[Nm]
P	Maximálny výkon motora	[kW]
r	Polomer pneumatiky	[m]
α_1	Uhol otočenia hnacej hriadele	[°]
α_2	Uhol otočenia hnaného hriadeľa	[°]
α_{Al}	Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti pre hliník	[K ⁻¹]
β	Uhol zvieraný osami hnacieho a hnaného hriadeľa	[°]
Δt	Rozdiel teplôt	[K]
τ	Napätie v strihu	[MPa]
τ_{25}	Pevnosť lepidla v strihu pri teplote 25°C	[MPa]
τ_{DI}	Dovolená pevnosť v strihu	[MPa]
τ_{ptl}	Pevnosť lepidla v strihu	[MPa]
ω_{kr}	Teoretická kritická uhlová rýchlosť dutého hriadeľa	[rad/s]

Úvod

V roku 2017, kedy začalo moje štúdium na vysokej škole, som sa pridal do študentského tímu, ktorý každoročne stavia závodný monopost. Formula Student je výborná príležitosť, kedy si môže študent vyskúšať svoje znalosti nadobudnuté počas štúdia v praxi a zároveň sa popasovať s problémami, ktoré sa bežne vyskytujú pri návrhu a vývoji nových komponentov.

Motoršport a hlavne formula je odbor, ktorý prináša množstvo nápadov a technického pokroku aj pre bežné využitie v automobilovom priemysle. Môj subjektívny názor je, že ďalší pokrok v rozvoji tejto oblasti nie je možný bez použitia kompozitných materiálov. To je jeden z dôvodov, prečo som sa rozhodol pre tému kompozitných hnacích hriadeľov. Pevne verím, že vývoj nosných kompozitných dielov prinesie ďalší pokrok do tímu, ktorého som súčasťou.

Cieľom bakalárskej práce je teda konštrukčný návrh hnacích hriadeľov pre monopost Formula Student. Táto práca sa zaoberá konštrukčným návrhom tripodov a vývojom vlastnej kompozitnej rúrky v spolupráci s firmou Brebeck Composite, pričom výsledný návrh musí spĺňať zástavové rozmery a musí priniesť úsporu na hmotnosti vozidla.

Výsledný návrh kompozitnej rúrky a lepeného spoja je testovaný krutovou skúškou pre určenie statickej bezpečnosti.

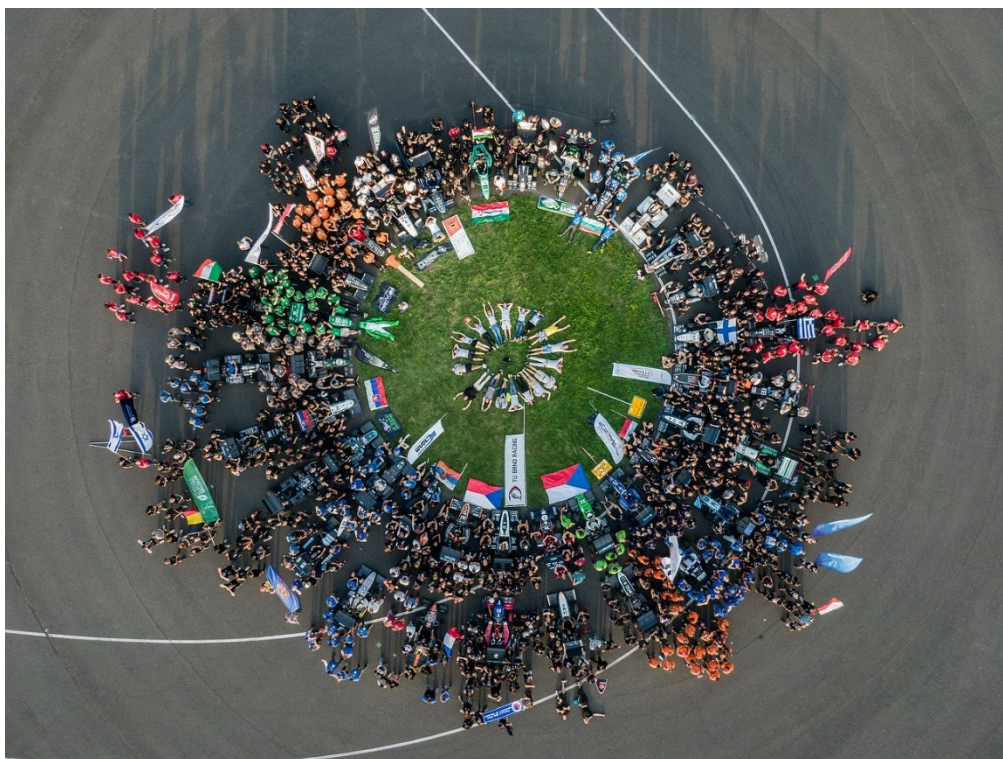
1 Formula Student

Formule Student/SAE (Society of Automotive Engineers) je konštruktérska súťaž pre študentov technických vysokých škôl, organizovaná pod záštitou SAE International, ktorá vznikla v Amerike v roku 1980. Cieľom je simulovať malú vývojovú firmu, ktorá má za úlohu pochopiť, navrhnuť a vyrobiť závodné vozidlo, ktoré je ponúknuté neprofesionálnemu víkendovému jazdcovi. Vozidlo je tiež prezentované fiktívnemu investorovi a prezentovaná je aj fiktívna malosériová výroba 10 000ks. V dnešnej dobe je súťaž Formula Student rozdelená na tri kategórie:

- Vozidlá so spaľovacím motorom
- Vozidlá s elektrickým motorom
- Autonómne vozidlá

Veľký dôraz je kladený na pravidla súťaže, ktoré sú aktualizované každú sezónu. V pravidlách súťaže sú zahrnuté najrôznejšie kritériá ako napríklad maximálny zdvihový objem motora 700 cm³, maximálny rázvor 1525 mm a mnoho ďalších.

Po úspešnom dokončení vozidla sa tímy môžu zúčastniť závodov, ktoré sú organizované po celom svete. Kritéria na zúčastnenie sa závodov sú napríklad úspešne zvládnutie registrácii, teda tímového kvízu a zaplatení štartovného.



Obrázok 1 - Účastníci FS Czech 2019 [1]

1.1 Disciplíny Formula SAE/Student

Disciplíny súťaže Formula Student sa delia na dve časti a to na statické disciplíny a dynamické disciplíny. Statických disciplín sa môže zúčastniť každý tím, bez ohľadu na vozidlo. Mnoho tímov začína prezentovaním statických disciplín bez funkčného vozidla ako prípravu na ďalšie sezóny. Dynamických disciplín sa môže tím zúčastniť iba s funkčným vozidlom, ktoré úspešne zvládlo nebodovanú technickú kontrolu.

Statické disciplíny

- Design – Hodnotí konštrukčné riešenia vozidla a pohľad konšuktéra na výkon vozidla a celkovú pridanú hodnotu. (150b)
- Správa výrobných nákladov – Hodnotí schopnosť tímu zvážiť rozpočet a výrobné hľadiská pre efektívnu výrobu a ekonomickosť. (100b)
- Biznis plán – Hodnotí schopnosť tímu poskytnúť obchodný, logistický a výrobný plán, ktorý presvedčí investorov vložiť financie do tímového konceptu. (75b)

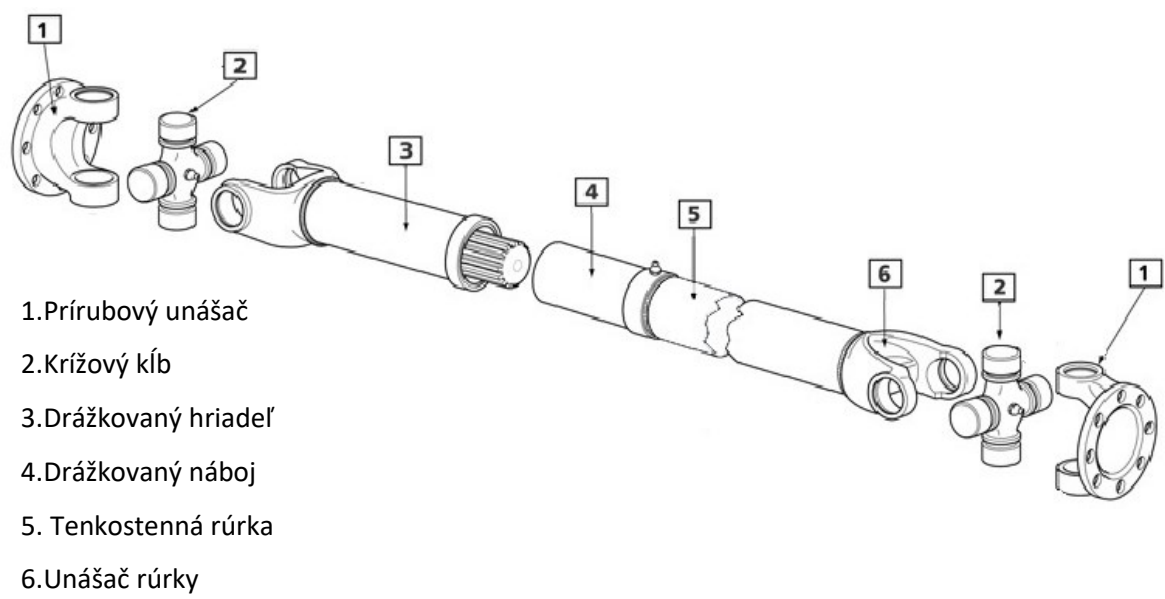
Dynamické disciplíny

- Akcelerácia – Akcelerácia vozidla v priamom smere na 75m. (100b)
- SkidPad – Meria schopnosť vozidla zatáčať pri konštantnom rádiuse na dráhe v tvare 8. (75b)
- Autocross – Hodnotí obratnosť a ovládanie vozidla na krátkom okruhu. (125b)
- Endurance – Hodnotí celkový výkon vozidla na dráhe dlhej 22km, zároveň testuje spoľahlivosť a odolnosť vozu. (275b)
- Efficiency – Hodnotí spotrebu paliva pri vytrvalostnom závode endurance. (100b) [2]

2 Hnacie hriadele

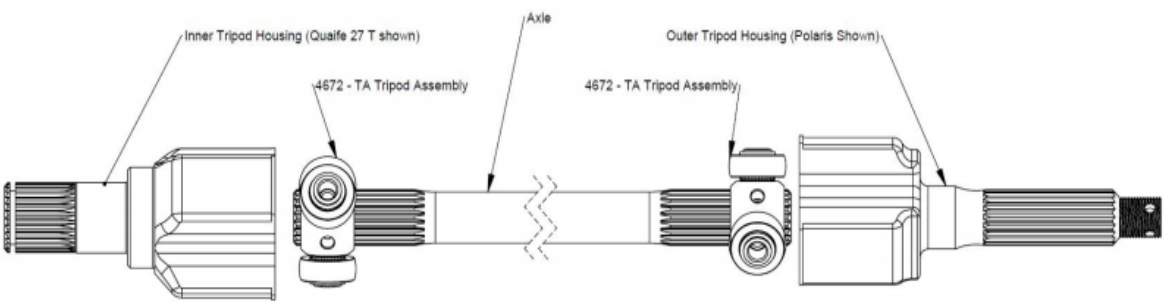
Kĺbový hnací hriadeľ je prevodové ústrojenstvo pre stále spojenie. Slúži k prenosu točivého momentu medzi dvoma prevodovými ústrojmi od seba oddelenými (prevodovka – rozvodovka, rozvodovka – kolesá), ktoré vplyvom zvislých pohybov (kmitanie od nerovnosti vozovky, kmity motora) menia svoju vzájomnú polohu. Hriadele sa delia na pozdĺžne a priečne. [3]

Pozdĺžne hnacie hriadele pre štandardný pohon (tiež tzv. spojovací hriadeľ) tvorí obvykle tenkostenná rúrka, ktorej predný koniec má drážkovanie pre pripojenie na hnaný unášač predného kĺbu. K zadnému koncu hriadeľa je prizváraný unášač druhého kĺbu. Drážkované spojenie umožňuje zmenu dĺžky pri zvislých výkyvoch nápravy. [3]



Obrázok 2 - Schéma pozdĺžnej hnacej hriadele [4]

Úlohou priečných hnacích hriadeľov je prenášať hnací moment z diferenciálu na hnacie kolesá a vyrovnávať pritom rozdiely dĺžok náprav pri prepružení. Pre kompenzáciu rozdielov v dĺžkach nápravy , ktoré vznikajú pri prepružení, sa ako vnútorný kĺb používa kĺb zásuvný. [3]



Obrázok 3 - Priečna hnacia hriadeľ RCV FSAE AXLE použitá na monoposte Vector05 [5]

2.1 Dôležité kritéria hnacích hriadeľov

Pevnosť

Prvá vec ktorú treba brať do úvahy pri návrhu hnacích hriadeľov je pevnosť vzhľadom na výkon a hmotnosť vozidla. Napríklad vozidlo s hmotnosťou 1000 kg a výkonom 150 hp je schopné preniesť menší točivý moment na hriadeľ ako vozidlo s hmotnosťou 2000 kg o rovnakom výkone. Pevnosť hriadeľa ovplyvňujú tri faktory: materiál, priemer a veľkosť hnacích kĺbov. [6]

Kritická uhlová rýchlosť

Kritická uhlová rýchlosť je situácia, kedy je vlastná frekvencia hriadeľa rovnaká ako otáčky, ktoré hriadeľ vykonáva. Vtedy sa tieto zhodné vibrácie znásobia a môžu vzniknúť vibrácie tak vysoké, že dôjde k poškodeniu hriadeľa. Kritickú uhlovú rýchlosť ovplyvňujú tri faktory a to: dĺžka, priemer a pomer hmotnosti k materiálovej tuhosti hriadeľa. [6]

Teoretická kritická uhlová rýchlosť dutého hriadeľa sa určí zo vzťahu [3]:

$$\omega_{kr} = 1,28 \cdot 10^4 \cdot \frac{\sqrt{(D'^2 + d'^2)}}{l'^2} \quad [rad/s] \quad (1)$$

kde D' [m] je vonkajší priemer hriadeľa, d' [m] je vnútorný priemer hriadeľa a l' [m] je dĺžka hriadeľa.

Skutočná kritická uhlová rýchlosť je vplyvom vôle a tuhosti uloženia príp. nedostatočného vyváženia hriadeľa nižšia, a to asi $0,6 \div 0,8$ vypočítanej teoretickej hodnoty. [3]

Hmotnosť

Po kritériách pevnosti a uhlovej rýchlosti je vhodné zhodnotiť hmotnosť hriadeľa. Na rozdiel od pevnosti a uhlovej rýchlosti, hmotnosť hriadeľa priamo ovplyvňuje jazdný výkon. Ťažší hnací hriadeľ nielenže zvýši hmotnosť celého vozidla, ale vozidlo bude taktiež potrebovať viac energie na roztočenie ťažšieho hnacieho hriadeľa. [6]

2.2 Materiály hnacích hriadeľov

Oceľ

Oceľ je najbežnejší materiál pre výrobu hnacích hriadeľov, pretože nie je len pevná a odolná, ale zároveň ekonomicky a výrobné efektívna. Zjavná nevýhoda u oceľových hriadeľov je hmotnosť. Tá zvyšuje rotačnú hmotu hriadeľa, čo okráda vozidlo o výkon viac ako nižší výkon motora. Na výrobu oceľových hriadeľov sa využívajú dva typy ocelí a to „mildsteel“ alebo mäkká oceľ a chróm-molybdénová oceľ. Obe nesú svoje výhody a nevýhody. Chróm-molybdénová oceľ je vhodná na vysoké výkony, avšak ekonomicky nákladnejšia, kým mäkká oceľ lepšie odoláva rázom. [7]



Obrázok 4 - Oceľová hnacia hriadeľ pre závodné vozidlá [7]

Hliník

Hlavná výhoda hliníkových hriadeľov je ich charakteristicky nízka hmotnosť. Nižšia hmotnosť má vplyv na nevyváženosť a kritickú rýchlosť hriadeľa. Pri vysokých otáčkach začne dlhý tenký hriadeľ rezonovať. Pretože hliník je ľahší než oceľ, môže byť hrúbka steny väčšia, čo zvýši stabilitu hriadeľa, bez zvýšenia momentu zotrvačnosti a zníženia výkonu vozidla. Nevýhodou hliníku však je, že nie je tak pevný ako oceľový hriadeľ a zároveň ho nie je možné kalíť. Dôjde teda k rýchlejšiemu opotrebovaniu ako u oceľových hriadeľov.[7]



Obrázok 5 - Oceľová a hliníková hnacia hriadeľ pre závodné vozidlá [7]

Uhlíkové vlákno

Uhlíkové vlákno je bezpochyby najdrahší z materiálov, ktoré sa používajú na výrobu hnacích hriadeľov. Faktom je, že uhlíkové vlákno má najlepší pomer hmotnosti k pevnosti, než akýkoľvek iný materiál a zároveň má veľmi dobre tlmiace účinky. Pre predstavu karbónové hriadele sú o $36 \div 108\%$ ľahšie, než rovnaké oceľové a zároveň o 50% pevnejšie. Výhody tohto materiálu sú dôležité pri výrobe dlhých hriadeľov, používaných tiež v letectve a lodných pohonoch. Avšak, kvôli technológii výroby karbónových hriadeľov je komplikované určiť dynamický výpočet pre určenie kritickej rýchlosti. Podľa výskumov však zvládajú o $15 \div 40\%$ vyššie kritické otáčky, než hriadele oceľové, hliníkové a titánové. Nevýhodou je však nutnosť hybridného riešenia, napr. oceľ a kompozit a riešenie spojenia týchto dvoch materiálov. [7,8]



Obrázok 6 - Kompozitné hnacie hriadele RCV [9]

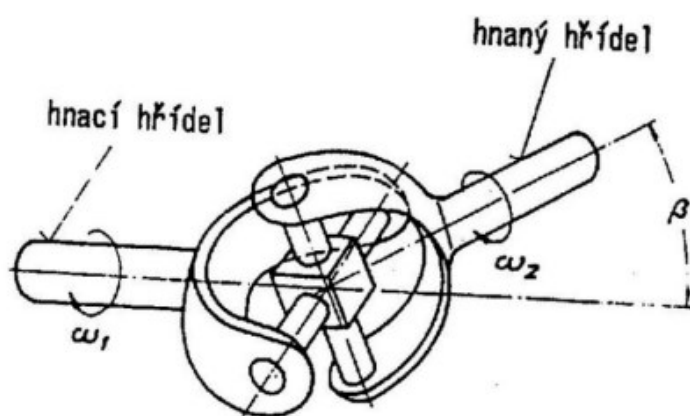
2.3 Hnacie kĺby

Hnací kĺb je druh kĺbu, ktorý umožňuje prenos otáčok medzi hriadeľom v rôznom uhle pri zachovaní konštantnej rýchlosti. Používa sa na hnacej náprave, ale aj na viacprvkových nápravách, teda s nezávislým zavesením kolies. Aby kĺby fungovali správne, musia byť dostatočne mazané plastickým mazivom a chránené pred vnikom nečistôt manžetami. [10]

Krížový kĺb

Klasické rotačné spojenie dvoch rôznobežných hriadeľov tvorí krížový (kardanový) kĺb. Je tvorený dvoma dvojramennými vidlicami pootočenými o 180° , ktoré sú spojené pomocou krížového čapu. Uloženie čapu v unášačoch je spravidla cez ihlové ložiská. Jeho nevýhodou je, že hnaný unášač oproti hnaciemu behom jednej otáčky zrýchľuje a spomaľuje. To sa odstraňuje použitím dvoch krížových kĺbov s presne danou montážou. Krížový kĺb je sférický mechanizmus, pre ktorý možno odvodiť základnú závislosť medzi okamžitým uhlom otočnej hnacej hriadele α_1 , uhlom otočenia hnaného hriadeľa α_2 a uhlom, ktorý zvierajú osi otáčania hnacieho a hnaného hriadeľa β : [3,11]

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\cos \beta} \quad (2)$$

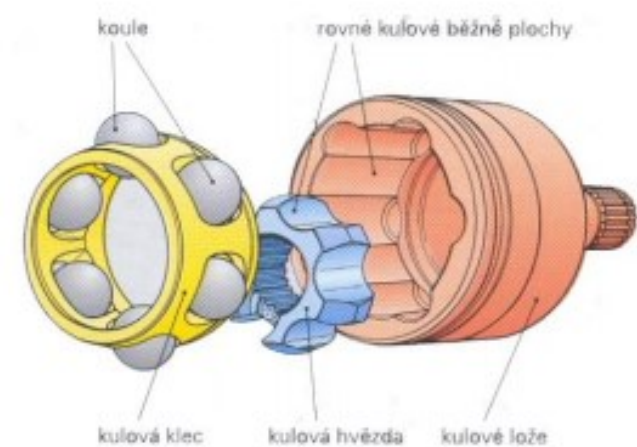


Obrázok 7 - Princíp krížového kĺbu [3]

Rzeppov-Bierfieldov kĺb

Je charakteristický šiestimi guľčkami a v súčasnosti predstavuje aj svetovo najrozšírenejší typ homokinetického kĺbu. Bol vyvinutý pre vozidlá so zadným náhomom a nezávislým odpružením. Guľčky sa odvaľujú po kruhových dráhach zhotovených vo

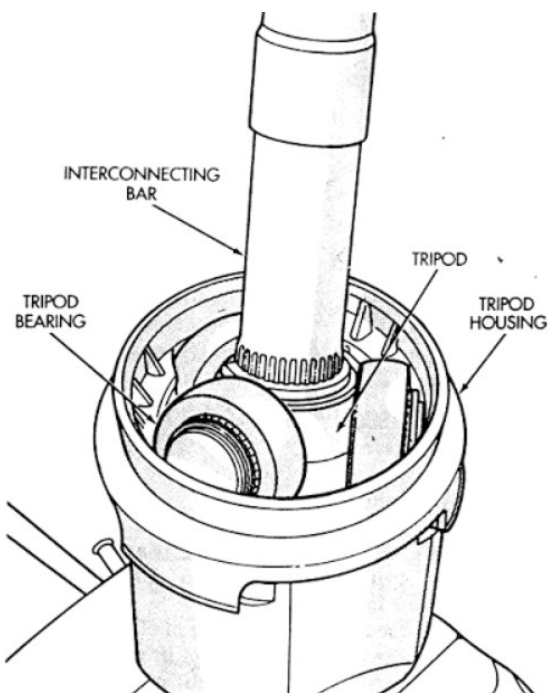
vidliciach kĺbu a týmto spôsobom prenášajú hnací točivý moment. Rozlišuje sa medzi guľôčkovými pevnými a guľôčkovými rovnobežne posuvnými kĺbmi. [3,12]



Obrázok 8 - Rovnobežný kĺb (Rzreppov-Brifieldov) [11]

Hviezdicový kĺb (Tripode)

Hviezdicový kĺb Tripode (trojnožka) s trojramennou hviezdou je charakteristický svojou pomerne ľahkou montážou a dobrou únosnosťou. Používajú sa pevné aj posuvné varianty. Trecie sily, ktoré sa prejavujú pri praktickom použití sú minimalizované sférickými valčekmi v ihličkových ložiskách. Nízke axiálne namáhanie, z toho vyplýva kĺb dlhej životnosti. Využitím hviezdicových pevných kĺbov možno dosiahnuť uhlu zalomenia až 45°. Rovnobežne posuvné hviezdicové kĺby umožňujú rozsah posuvu až do 55 mm pri maximálnom uhle ohnutia do 25°. U automobilov so zadným pohonom sú ako na strane prevodu, tak na strane kolies, prednostne montované posuvné kĺby, pretože zaručujú dobré vyladenie v závesoch zadných kolies. [3]



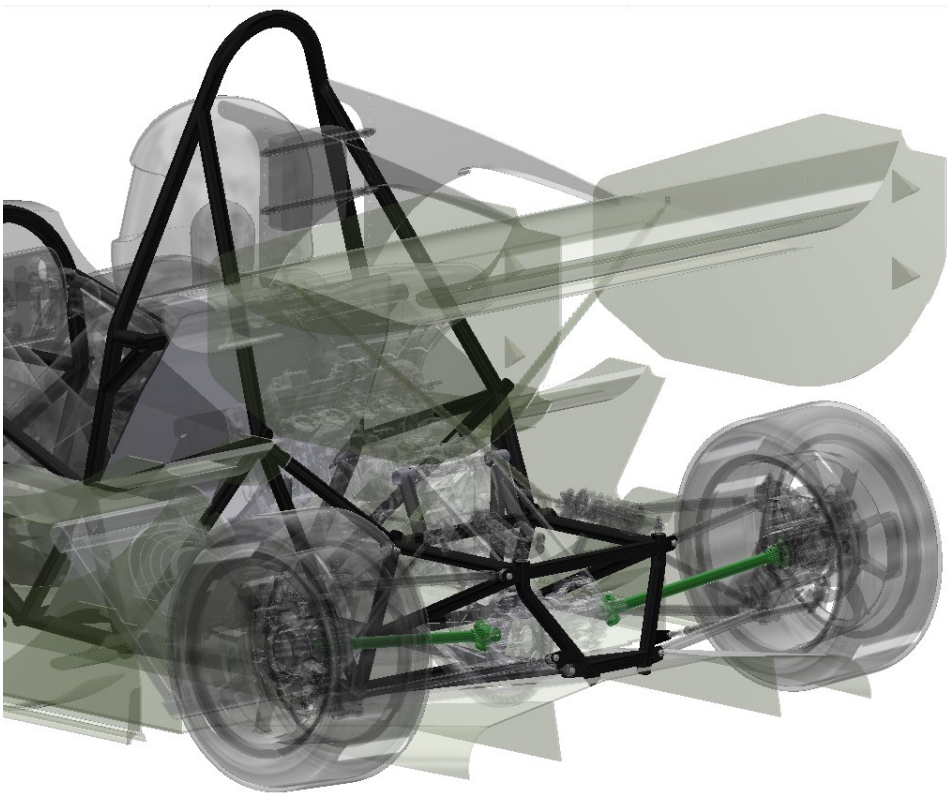
Obrázok 9 - Hviezdicový kĺb (Tripode) [13]

3 Konštrukčné riešenie hnacích hriadeľov

Vozidlo Vector05 využíva priečne oceľové hnacie hriadele firmy RCV a to v dvoch dĺžkových variantoch 17" a 16,7". Hnacie kĺby na vozidle sú použité posuvné hviezdicové, takisto dodávané firmou RCV. Pričom spojenie tripodu a hriadele zabezpečuje rovnoboké drážkovanie. O prenos krútiaceho momentu z diferenciálu na hriadeľ sa stará kalený náboj s tvarovou drážkou. O prenos momentu z hriadeľa na koleso sa stará hliníkový náboj s oceľovou vložkou.

Tabuľka 1 - Hmotnosť hnacích hriadeľov Vector05

	Hnací hriadeľ 17"	Hnací hriadeľ 16,7"
RCV Tripod zostava (2KS)	326 g	326 g
RCV hriadeľ	695 g	684 g
Poistné krúžky (4KS)	12 g	12 g
Celková hmotnosť	1 033 g	1 022g



Obrázok 10 – Uloženie priečných hriadeľov monopostu Vector05

Hnacie hriadele pre vozidlo Vector06 budú využívať momentálne konštrukčné riešenie prenosu točivého momentu. Je to jednak z hľadiska ekonomického, keďže výroba tvarových drážok je značne nákladná, druhý dôvod je, že sa jedná o vývoj komplikovaných dielov a teda pri poškodení bude možné použiť oceľové hriadele ako náhradný diel.

4 Výpočet momentov pôsobiacich na hriadeľ

4.1 Výpočet krútiaceho momentu od motora

Maximálny výkon	$P = 69 \text{ kW}$
Maximálny krútiaci moment (na kľukovom hriadeľi)	$M_k = 58 \text{ Nm}$
Primárny prevodový pomer	$i_p = 1.955 [-]$
Prevodový pomer 1. prevodový stupeň	$i_1 = 1.947 [-]$
Sekundárny prevodový pomer (reťazový prevod)	$i_s = 4.18 [-]$

Maximálny celkový prevodový pomer

$$i_{max} = i_p \cdot i_1 \cdot i_s = 1.955 \cdot 1.947 \cdot 4.18 = 15.911 \tag{3}$$

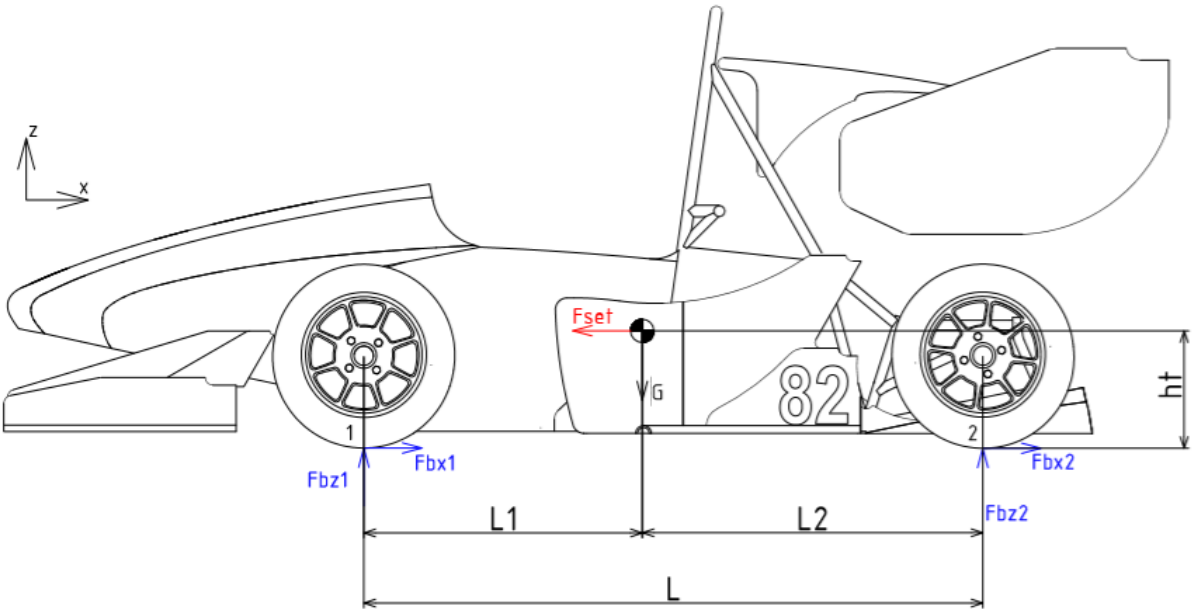
Výstupný krútiaci moment na diferenciály

$$M_v = M_k \cdot i_{max} = 58 \text{ Nm} \cdot 15.911 = 922.82 \text{ Nm} \tag{4}$$

Moment na jednej hriadeľi

$$M_{vp} = \frac{1}{2} \cdot M_v = \frac{1}{2} \cdot 922.82 \text{ Nm} = 461.41 \text{ Nm} \tag{5}$$

4.2 Výpočet brzdného momentu



Obrázok 11 - Brzdné reakcie

Hmotnosť vozidla	$m_{voz} = 213 \text{ kg}$
Hmotnosť pilota	$m_p = 75 \text{ kg}$
Celková hmotnosť	$m_{cel} = m_{voz} + m_p = 288 \text{ kg}$
Polomer pneumatiky	$r = 0.235 \text{ m}$
Tiažová sila vozidla	$G = m_{cel} \cdot g = 2\,824 \text{ N}$
Rázvor	$L = 1600 \text{ mm}$
Vzdialenosť ťažiska od prednej nápravy	$L_1 = 880 \text{ mm}$
Vzdialenosť ťažiska od zadnej nápravy	$L_2 = 720 \text{ mm}$
Výška ťažiska	$h_t = 310 \text{ mm}$
Trecí koeficient (vozovka – pneumatika)	$\mu = 1.5 \text{ [-]}$
Zotrvačná sila	$F_{set} = m_{cel} \cdot \mu \cdot g = 4\,236 \text{ N}$

Pre výpočet momentu pôsobiaceho na hriadeľ najskôr zostavím rovnicu rovnováhy k bodu 1:

$$F_{bz2} \cdot L - G \cdot L_1 + F_{set} \cdot h_t = 0 \quad (6)$$

A teda brzdná reakcia na zadnú nápravu bude:

$$F_{bz2} = \frac{G \cdot L_1 - F_{set} \cdot h_t}{L} = \frac{2\,824 \text{ N} \cdot 880 \text{ mm} - 4\,236 \text{ N} \cdot 310 \text{ mm}}{1600 \text{ mm}} = 732,6 \text{ N} \quad (7)$$

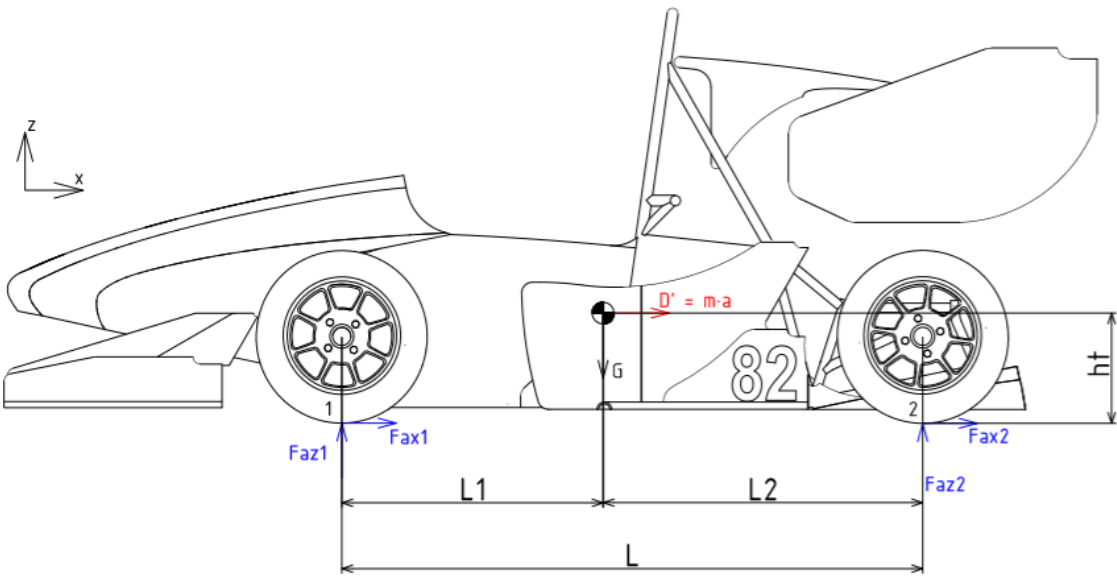
Trecia sila ktorá vzniká na zadnej náprave bude:

$$F_{bx2} = F_{bz2} \cdot \mu = 732,6 \text{ N} \cdot 1.5 = 1\,099 \text{ N} \quad (8)$$

Výsledný brzdný moment na jednej hriadeli je:

$$M_b = \frac{1}{2} \cdot F_{bx2} \cdot r = \frac{1}{2} \cdot 1\,099 \text{ N} \cdot 0.235 \text{ m} = 129 \text{ Nm} \quad (9)$$

4.3 Výpočet maximálneho momentu preneseného pneumatikou



Obrázok 12 - Reakcie pri akcelerácii

Pre výpočet momentu pôsobiaceho na hriadeľ pri akcelerácii som zaviedol do reakcií d'Alembertovu silu. Údaje pre pozdĺžne zrýchlenie som získal z telemetrie vozu, kde počítam s najvyššie dosiahnutou hodnotou zrýchlenia.

Time (s)	Distance [IG_RPM [r	IG_TPS [%	GPS_Speed	GPS_LonAcc [g]	
104,7	67,9	8565,328	45,792	0,684	0	
104,8	67,93	9066,839	46,252	1,152	0	
104,9	67,99	9848,06	45,707	2,108	0	
105	68,08	10401,07	39,979	3,277	0	
105,1	68,21	10273,31	34,963	4,606	0	
105,2	68,37	10116,77	31,629	6,006	0,028	
105,3	68,58	9496,374	35,731	7,435	0,195	
105,4	68,83	8963,225	33,206	8,98	0,445	
105,5	69,13	8182,737	36,274	10,61	0,464	1,458
105,6	69,47	7510,769	38,808	12,31	0,48	
105,7	69,86	7256,957	41,082	14,01	0,495	
105,8	70,3	6994,906	47,636	15,77	0,518	
105,9	70,79	7314,198	59,384	17,689	0,553	
106	71,34	7939,579	66,457	19,651	0,594	
106,1	71,94	8480,291	68,621	21,813	0,624	
106,2	72,61	9074,658	71,252	24,144	0,623	
106,3	73,36	9624,216	77,145	26,408	0,604	
106,4	74,14	10227,63	79,209	28,372	0,607	
106,5	74,99	10332,19	44,746	30,536	0,665	
106,6	75,91	9528,391	39,134	32,964	0,765	

Obrázok 13 - Pozdĺžne zrýchlenie, telemetria Vector05

Maximálne pozdĺžne zrýchlenie (telemetry)

$$a_{long} = 1.458g = 14.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Pre výpočet momentu pôsobiaceho na hriadeľ najskôr zostavím rovnicu rovnováhy k bodu 1:

$$F_{az2} \cdot L - G \cdot L_1 - m_{cel} \cdot a_{long} \cdot h_t = 0 \quad (10)$$

A teda reakcia pri zrýchlení na zadnú nápravu bude:

$$F_{az2} = \frac{G \cdot L_1 + m_{cel} \cdot a_{long} \cdot h_t}{L} = \frac{2\,824 \text{ N} \cdot 880 \text{ mm} + 288 \text{ kg} \cdot 14.3 \text{ ms}^{-2} \cdot 310 \text{ mm}}{1600 \text{ mm}} \\ = 2\,351 \text{ N} \quad (11)$$

Tretia sila, ktorá vzniká bude:

$$F_{ax2} = F_{az2} \cdot \mu = 2351 \text{ N} \cdot 1.5 = 3527 \text{ N} \quad (12)$$

Výsledný moment pri zrýchlení na jednej hriadeli je:

$$M_a = \frac{1}{2} \cdot F_{ax2} \cdot r = \frac{1}{2} \cdot 3527 \text{ N} \cdot 0.235 \text{ m} = 415 \text{ Nm} \quad (13)$$

Z výpočtu vyplýva, že maximálny možný prenesený moment je 415 Nm. Teda:

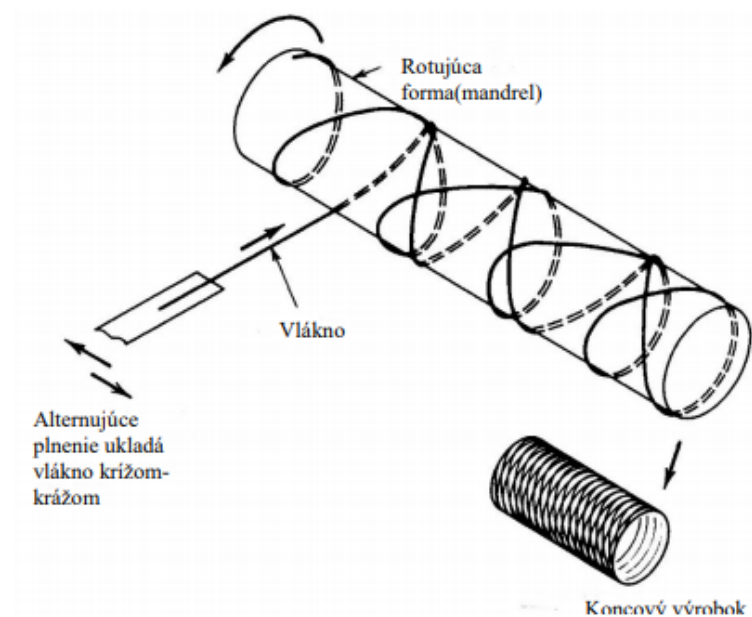
$$M_{vp} > M_a \quad (14)$$

Pre ďalšie výpočty budem používať maximálny moment, ktorý prenesie pneumatika pri akcelerácii, keďže pri väčšom momente dôjde k prekĺzavaniu kolies.

5. Kompozitná rúrka

Technológia výroby rúrok z uhlíkových vlákien

Výroba kompozitných rúrok spočíva v navíjaní vlákna na kužeľový trň, pričom vlákno je kladené pod rôznymi uhlami podľa toho, aké mechanické vlastnosti má daný výrobok (kompozit) splňovať, teda či sa jedná o namáhanie tlakom, ohybom alebo krutom a i. Táto metóda sa používa tiež pre výrobu profilov určených na bicyklové rámy, alebo tlakových nádob. Na navíjanie je možné použiť rôzne typy materiálov, ako uhlíkové, aramidové vlákno, sklené vlákno alebo ich kombinácia, tzv. hybridy (uhlík-aramid). Takisto je možné vyrábať komponenty s vláknom veľmi vysokej pevnosti v ťahu, z ktorých nie je možné vyrábať tkaninu pre ich krehkosť.



Obrázok 14 - Výroba kompozitov prostredníctvom navíjania vlákien [14]

5.1 Návrh a výroba kompozitnej rúrky

Súťaž Formula Student je zameraná na konštruktérské riešenia, rozhodol som sa v spolupráci s firmou Brebeck Composite vyrobiť vlastnú trubku metódou laminácie prepregu, namiesto zakúpenia polotovaru, čo prinesie do tímu ďalšie poznatky o kompozitoch.

Keďže táto práca sa nezaoberá výpočtovým modelom samotnej kompozitnej rúrky, návrh bol vytvorený v spolupráci na základe určitých požiadavkov. Dĺžka samotnej rúrky je daná zástavovými rozmermi, priemer rúrky maximálne 45 mm. Po zvážení všetkých predpokladov som zvolil rúrku s vnútorným priemerom 40 mm a hrúbkou steny 2 mm.

Väčší priemer zabezpečí možnosť použitia menšej hrúbky steny pri zachovaní momentu zotrvačnosti. Vďaka väčšiemu priemeru sa takisto zväčšila plocha, do ktorej budú vlepené oceľové tripody, tie vďaka tomu môžu byť kratšie, čo šetrí hmotnosť.

LAYOUT

Layout alebo skladba jednotlivých vrstiev bola zvolená na základe odborných skúsenosti firmy Brebeck. Samotný layout je z vrstiev prepregu a následne nalaminovaný na formy.



Obrázok 15 - Layout kompozitnej rúrky

Výsledný layout:

- GG380T 45°
- UD 420 90°
- GG380T 90°
- GG380T 90°
- UD 420 90°
- GG380T 45°

Skladba layoutu spočíva na základe namáhání, ktoré na hriadeľ budú pôsobiť. Prvá a posledná vrstva otočená o 45° dáva rúrke pevnosť v krute. Dve stredové vrstvy sa starajú o pevnosť v ťahu a ohybe a o tvarovú stálosť. Tieto vrstvy sú z tkaniny typu kepr s hmotnosťou 380g / m². Vrstvy z vlákna typu UD alebo UniDirection, teda jednosmerné vlákna dodávajú rúrke tuhosť a stálosť v 0°, teda v jej osi.

Výroba kompozitnej rúrky, technologický postup

Prvý krok pri laminácii je pripravenie formy. Keďže som chcel čo najekonomickejšie riešenie, neprichádzala do úvahy delená forma, ktorej nutné obrábanie by výrobu značne predražilo. Zvolil som teda jednoduché riešenie, kedy budú jednotlivé vrstvy navinuté na hliníkovú tyč s priemerom 40 mm, teda vnútorný priemer rúrky. Nevýhodou tejto varianty je, že pohľadová vrstva vznikne na vnútornej stene výrobku. Kvôli rozmerom hriadeľov a testovacích vzoriek, som sa rozhodol pre dĺžku 1000 mm, čo však skomplikovalo vytiahnutie z foriem. Polotovary ďalej bolo potrebné prerovnať, vybrúsiť všetky nedokonalosti na povrchu, ktoré by sťažili vytiahnutie a následne ručne vyleštiť. Pred samotnou lamináciou bolo potrebné formy naseparovať. Naseparovanie zabezpečí uzatvorenie mikropórov na povrchu formy a takisto, že sa výrobok nepripečie na formu a teda pôjde jednoduchšie vytiahnuť. Použité boli 4 vrstvy wax-u, pričom každá vrstva sa vysušala 15 minút v saune.



Obrázok 16 - Príprava foriem na lamináciu

Po naseparovaní formy sa na čela tyčí narysovali osi rozdelené po 60°. Tieto osi slúžia na to, aby bola každá jedna vrstva rovnomerne posunutá voči ďalšej, boli zalaminované prelepy a zároveň sa dodržala symetria.

Kladenie jednotlivých vrstiev prebiehalo ručne. Proces spočíval v navinutí tkaniny obdĺžnikového tvaru s dĺžkou polotovaru a šírkou obvodu tyče, pričom bol na prvej vrstve prídavok jedného centimetra, ktorý zabezpečil prelep vrstvy.



Obrázok 17 - Kladenie vrstiev tkaniny

V prvom kroku sa najskôr navinuli 2 vrstvy, následne sa urobila medzi-operácia zvaná debulk. Táto operácia spočíva v zabalení výrobku do baliacej fólie, tzv. release film a následnom zabalení do vrečka, v ktorom sa pomocou vývevy vytvorilo vákuum s minimálnym podtlakom 0,85 bar po dobu minimálne 30 minút. Operácia slúži na odsatie prebytočného vzduchu z tkaniny a dokonalému prichyteniu vrstiev.



Obrázok 18 - Medzi-operácia debulk pri výrobe kompozitu

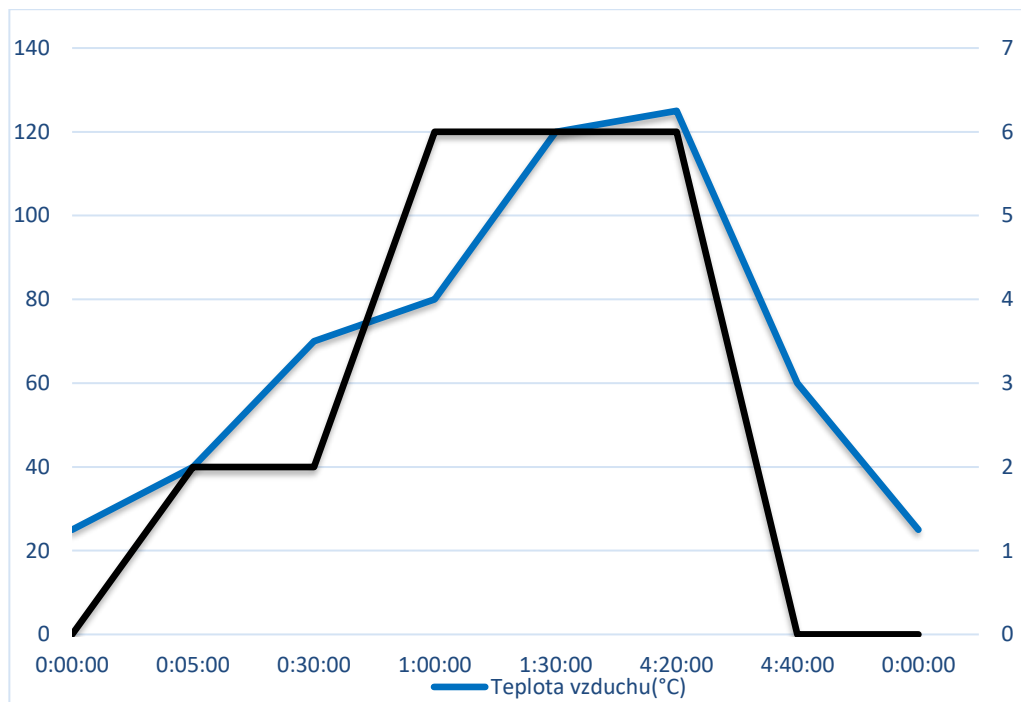
V druhom kroku laminácie sa na formy navinula vrstva 3 a 4, po ktorých opäť prišla na rad medzi-operácia debulk.

V poslednom kroku sa navinuli posledné dve vrstvy a nasledoval proces balenia. Výrobok sa najskôr zabalil do baliacej fólie a do flisu, mäkký materiál slúžiaci na odsatie prebytočného vzduchu z výrobku. Výrobok aj s dvoma odsávacími ventilmi sa vložil do vákuového vrečka, ktorého konce sa zalepili nepriepustnou páskou. Ventily vložené do vrečka slúžia na odsatie vzduchu a vytvorenie tlaku na povrchu výrobku, pričom minimálny podtlak musí byť 0,85 bar. Dva ventily sú z toho dôvodu, že jeden sa používa ako sací a druhý ako kontrolný, teda či nie je baliace vrečko poškodené a nevniká tak do vnútra vzduch a zároveň či je dodržaná hodnota podtlaku.

Takto zavákuovaný výrobok z prepregu sa musí umiestniť do autoklávu, pece ktorá vytvorí tlak a teplo na výrobok. Výrobok pritom musí prejsť takzvaným vypekáčim cyklom, ktorý udáva výrobca danej tkaniny. Je to proces, vďaka ktorému kompozit získa svoje finálne vlastnosti. Priložená tabuľka a graf popisuje presný vypekáč proces, ktorým výrobok prešiel.

Tabuľka 2 Vypekáč cyklus

Sekce	Hodnoty	1	2	3	4	5	6	7
Procedurální krok	Start/Stop	Operace	Operace	Operace	Operace	Operace	Operace	Start/Stop
Čas kroku	0:00:00	0:05:00	0:25:00	0:30:00	0:30:00	2:50:00	0:20:00	0:00:00
Teplota vzduchu (°C)	25	40	70	80	120	125	60	25
Tlak v autoklavu (bar)	0	2	2	6	6	6	0	0
Vakuum výrobku (bar)	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
Thermo-Head (°C)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Celkový čas	0:00:00	0:05:00	0:30:00	1:00:00	1:30:00	4:20:00	4:40:00	0:00:00



Obrázok 19 - Graf vypekacie cyklu

Po vypekacom cykle je nutné výrobok vytiahnuť z formy. Kvôli cene som však zvolil ako formu hliníkovú tyč, to však prinieslo komplikácie, keďže akákoľvek nerovnosť mohla spôsobiť zaseknutie. Vytiahnutie sa však podarilo uskutočniť bez poškodenia výrobku vďaka teplotnej rozťažnosti. Jednou z vlastností kompozitných materiálov je to, že pri teplotnej zmene sú rozmerovo stále, to je vlastnosť, ktorú je vhodné pri vyťahovaní využiť. Pri vypekacom cykle došlo k navýšeniu teploty o 100°C. A teda je možné spočítať rozťahnutie hliníkovej tyče, teda vnútorný priemer kompozitnej rúrky podľa:

$$D = D_0 \cdot (1 + \alpha_{Al} \cdot \Delta t) = 0,04 \text{ m} \cdot (1 + 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 100 \text{ K}) = 0,04009 \text{ m} = 40,09 \text{ mm} \quad (15)$$

Kde D_0 [m] je priemer hliníkovej tyče pri teplote 25 °C, α_{Al} [K⁻¹] je súčiniteľ tepelnej rozťažnosti a Δt [K] je rozdiel teplôt.

Podľa výpočtu tepelnej rozťažnosti bude priemer hliníkovej tyče pri tejto zmene 40,09 mm. To spôsobí, že po vytiahnutí z pece bude vnútorný priemer kompozitnej rúrky po schladnutí 40,09 mm, avšak priemer hliníkovej formy sa zmrští na pôvodných 40 mm. Po schladnutí sa výrobok s tyčou vložil ešte do mrazničky o teplote -15°C.

$$D_{-15} = D_0 \cdot (1 + \alpha_{Al} \cdot \Delta t) = 0,04 \text{ m} \cdot (1 - 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 40 \text{ K}) = 0,03996 \text{ m} = 39,96 \text{ mm} \quad (16)$$

Kde D_{-15} [m] je priemer hliníkovej tyče pri teplote -15 °C.

Vďaka tomu sa hliníková tyč zmrštila na 39,96 mm. Tieto zmeny za pomoci teploty vytvorili vôľu na priemery pre vytiahnutie formy 0,13 mm. Spôsob výroby zapríčinil vnútorný priemer rúrky 40,09 mm, ktorý sa už nebude obrábať, preto je nutné počítať s týmto priemerom aj pri návrhu lepeného spoja a pri výrobe koncovky, aby bola zaručená predpísaná vrstva lepidla.

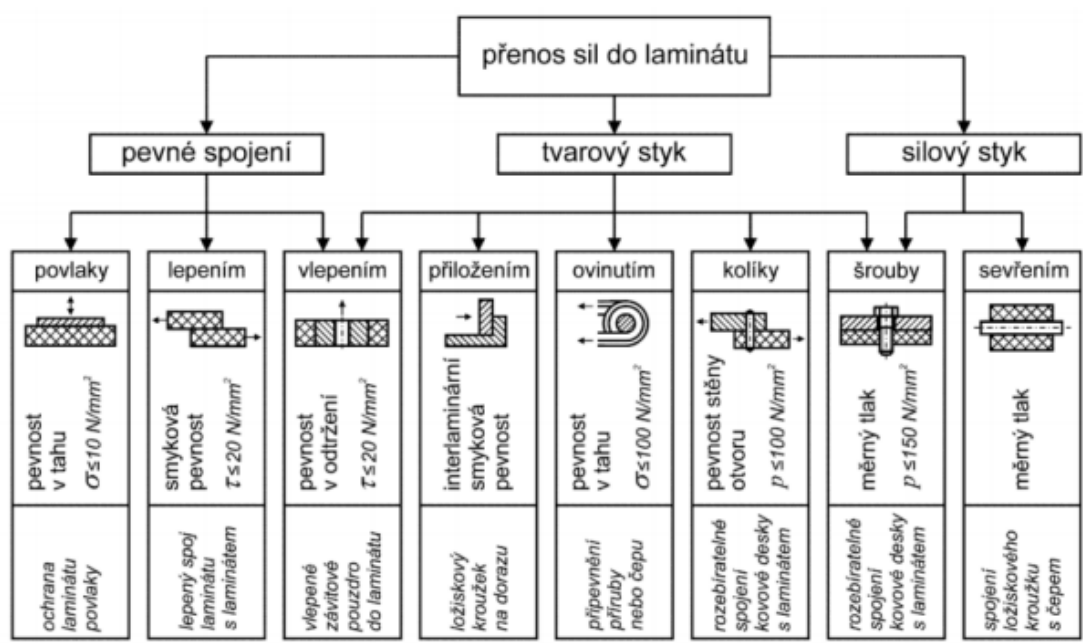


Obrázok 20 - Kompozitná rúrka

6 Návrh lepeného spoja

Ako už bolo spomenuté v kapitolách vyššie o prenos krútiaceho momentu a zmeny dĺžok hriadeľa sa starajú kĺby. Tieto kĺby však nie je možné vyrobiť z kompozitu, a teda musia byť kovové. Preto je potrebné zabezpečiť spoj kompozitnej rúrky a vložky.

Na trhu existujú rôzne varianty ktoré popisuje obrázok 21.



Obrázok 21 - Typy spojení ocel – kompozit [15]

Pre toto spojenie som sa rozhodol pre lepený spoj, tento variant je výrobne najjednoduchší a v prípade poškodenia koncovky je možná výmena za nový diel. Keďže na trhu je množstvo produktov, obmedzil som výber na tri varianty podľa požiadaviek na lepený spoj a podľa konzultácii s firmami.

Vzhľadom na to, že lepený spoj je dynamicky namáhaný, lepidlo musí byť húževnaté, aby nedošlo k jeho vystarnutiu a následnému vydroleniu. Tak isto môže dôjsť k zvýšeniu teploty, keďže teploty nad vozovkou môžu dosahovať 50°C a viac. Preto budem zvažovať iba lepidlá do vysokých teplôt.

GURIT Spabond 840

Vysoko pevnostné lepidlo s pevnosťou v strihu až 45MPa a dlhou životnosťou. Vhodné do pracovného prostredia s vysokými teplotami. Adhézne lepidlo vhodné na lepenie oceľ-kompozit s nižšou hmotnosťou v porovnaní so sklom plnenými lepidlami. [16]

3M™ Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

Štruktúrálné epoxidové lepidlo, ktoré má excelentné adhézne vlastnosti na povrchy ako oceľ, CFRP, GFRP. S maximálnou pevnosťou v strihu 37 MPa s tepelnou odolnosťou do 150°C. Bežne používané v leteckom priemysle. [17]



Obrázok 22 - Lepidlo Scotch-Weld EC-9323 [17]

Loctite Hysol EA 9394/C-2

Epoxidové lepidlo vhodné do veľmi vysokých teplôt, do 300°C s výbornou pevnosťou až do 204°C. Zároveň dobre odoláva agresívnemu prostrediu. Využívané najmä v leteckom priemysle. S hodnotou pevnosti v strihu 34.5 MPa pri 25°. [18]

Voľbu lepidiel som robil na základe skúsenosti a odporúčaní firiem a na základe bakalárskej práce Formula tímu z Brna ktorý už podobný návrh robil. Rozhodol som sa pre lepidlo Hysol C2, jeho výhodou je húževnatosť a veľmi dobrá odolnosť tepelných špičiek. Rovnako sa používa v motoršporte na súčiastky nábojov kolies, kde tak isto vznikajú vysoké teplotné špičky. Z ekonomického hľadiska som spravil čo najväčší prieskum trhu a rozhodol sa testovať len jedno z lepidiel.

6.1 Návrh dĺžky lepeného spoja

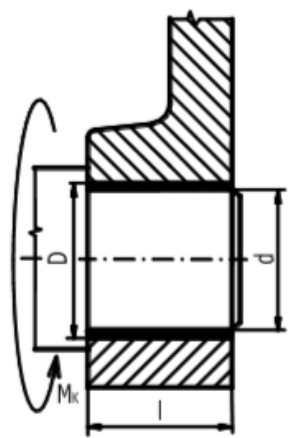
Pevnosť lepidla je značne závislá na druhu namáhania v lepenej ploche. Najväčšiu pevnosť má spoj namáhaný šmykom. Preto sa lepený spoj konštruuje tak, aby v lepenej ploche bolo jeho rozhodujúce namáhanie šmykové. [20]

V prípade lepeného náboja páky kolesa na hriadeli je kontrola šmykového napätia vyvolaná krutom [20]:

$$\tau = \frac{2 \cdot M_k'}{\pi \cdot \left(\frac{D+d}{2}\right)^2 \cdot l} \leq \tau_{Dl} = \frac{\tau_{Pl} l}{k_l}$$

(17)

kde M_k' [Nm] je točivý moment, D [mm] je vonkajší priemer vrstvy lepidla alebo vnútorný priemer rúrky, d [mm] vnútorný priemer vrstvy lepidla alebo priemer vlepovanej koncovky a l [mm] je činná dĺžka lepidla (viď. Obrázok 23). τ_{Pl} [MPa] je pevnosť v strihu lepidla, ktorú udáva výrobca a k [-] je bezpečnosť, ktorá sa volí 3÷4.



Obrázok 23 - Lepenie náboja páky k hriadeli [20]

Podľa údajov lepidla a pre zvýšenie pevnosti lepeného spoja volím pevnosť v ťahu lepidla pri 149°C 20.7 MPa. Zároveň priemer D bude mať hodnotu 40.09 mm kvôli technológii výroby a teda priemer tripodu bude mať priemer d = 39.97 kvôli odporúčanej vrstve lepidla, ktorá sa udáva ako požadovaná vôľa na priemere. Teda vôľa na priemere bude 0.12 mm a bezpečnosť k volím 3.

Test Temperature, °F/°C	Typical Results	
	psi	MPa
-67/-55	3,500	24.1
77/25	5,000	34.5
180/82	4,000	27.6
250/121	3,200	22.0
300/149	3,000	20.7
350/177	2,500	17.2
400/204	1,700	11.7
450/232	1,200	8.3
500/260	800	5.5

Obrázok 24 - Pevnosť lepidla vzhľadom na teplotu [18]

Teda výpočet dĺžky lepeného spoja bude:

$$l = \frac{2 \cdot M_a}{\frac{\tau_{ptl}}{k_l} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D+d}{2}\right)^2} = \frac{2 \cdot 415\,000\, Nmm}{\frac{20.7\, MPa}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{40.09\, mm + 39.97\, mm}{2}\right)^2} = 23.9mm \quad (18)$$

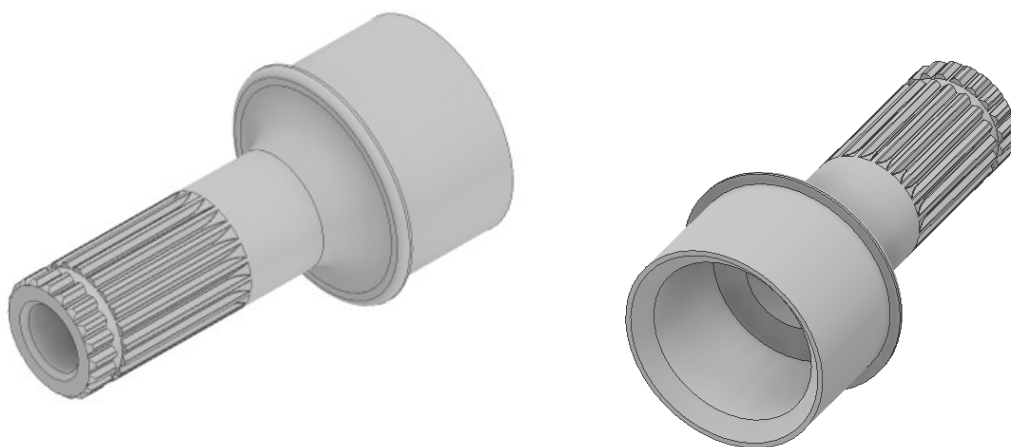
Volím dĺžku lepeného spoja 24 mm. Lepený spoj je však jedna z najkritickejších častí celého návrhu, ktorá môže zlyhať. Preto som sa rozhodol, že bez statickej skúšky v krute a reálnej validácie lepeného spoja a overenie vypočítanej dĺžky na testovacej súčiastke je finálna výroba oceľových koncoviek nelogická.

7 Návrh hnacieho kľbu

Vzhľadom na konštrukčné riešenie uloženia hriadele je nutné použiť hnací kľb typu tripod. Tak isto sú dané aj jeho rozmery a rozmery ložísk vzhľadom na tvárovú drážku náboja.

Variant 1

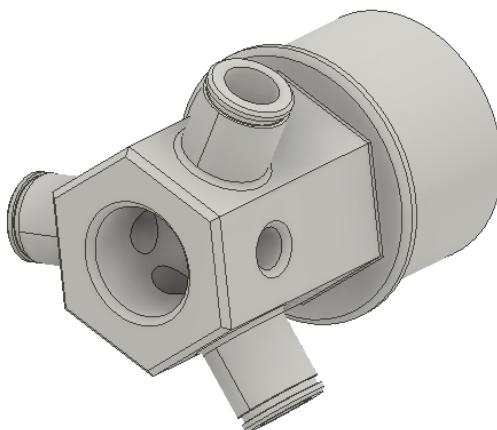
Variant číslo 1. je konštrukčne najjednoduchší. Keďže sa jedná o rovnaké drážkovanie ako je použité na hriadeli Vectora05, avšak vyrobené ako čap z ocele vhodný na vlepenie do kompozitnej rúrky.



Obrázok 25 - Hnací kľb variant 1

Variant 2

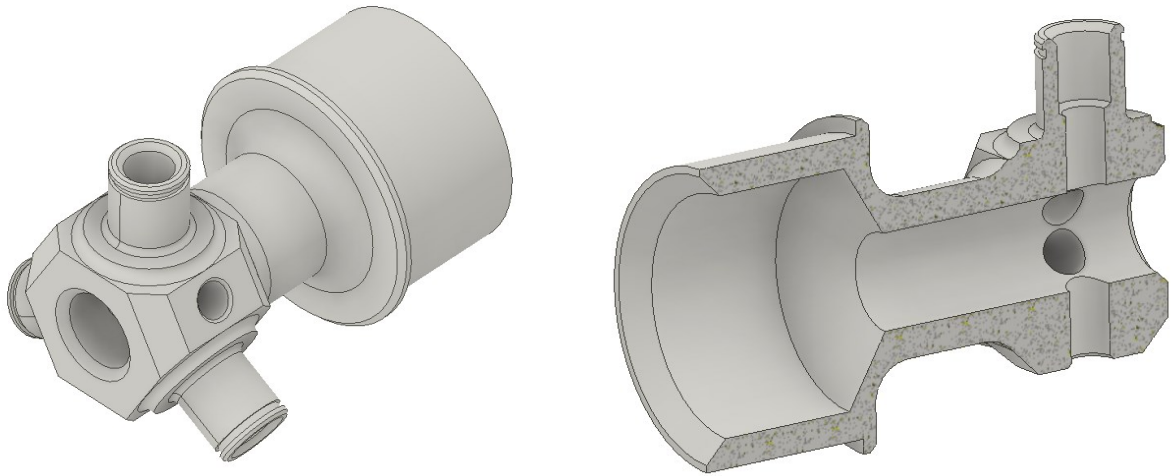
Variant číslo 2 je v prevedení, kedy čapy tripodu, na ktoré sa montujú ložiská, sú zakomponované priamo na čape. Pričom geometria bola volená čo najjednoduchšie, aby bolo možné súčiastku vyrobiť čo najjednoduchšie, napr. v deličke na 3-osej CNC fréze. Avšak, táto geometria dovolí natočenie iba o 7°.



Obrázok 26 - Hnací kľb variant 2

Variant 3

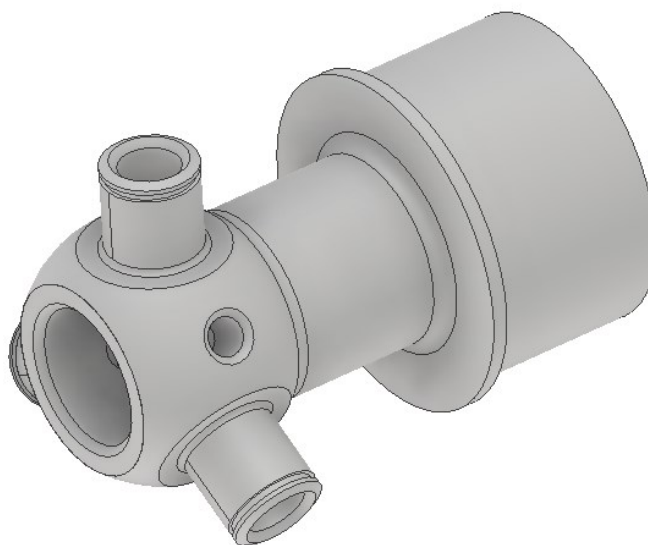
Variant 3 je v prevedení s komplikovanejšou geometriou, rovnako ako na variante 2, sú čapy tripodu vyrobené priamo na koncovke. Tentokrát však vychádzajú z osadenia, vďaka čomu pri MKP analýze kleslo napätie na vrube. Tento variant má možnosť výkyvu až o 21°.



Obrázok 27 - Hnací kĺb variant 3

Variant 4

Variant 4 má najkomplikovanejšiu geometriu, kde som sa inšpiroval tvarom tripodov, ktoré sú bežne dostupné na trhu. Zároveň je navrhnutý z pevnostného hliníku CERTAL (EN AW 7075). Tento variant má možnosť výkyvu o 25°.



Obrázok 28 - Hnací kĺb variant 4

7.1 Výber optimálneho variantu

Keďže ide o návrh pre závodné vozidlo, hlavnou úlohou je ušetriť hmotnosť, a teda to je aj prvé kritérium výberu, zároveň musí byť súčiastka dostatočne pevná a až na poslednom mieste je náročnosť výroby.

Pevnosť a náročnosť výroby sú hodnotené od 1-5 pričom 1 je najlepšie a 5 najhoršie.

Tabuľka 3 - Výber optimálneho variantu hnacieho kľbu

	Hmotnosť (Tripod + ložiská)	Celková hmotnosť	Pevnosť	Náročnosť výroby
Variant 1	220 g + 183g	383 g	1	2
Variant 2	293 g + 95g	388 g	3	2
Variant 3	260 g + 95g	355 g	2	3
Variant 4	88 g + 95g	183 g	5	5

Na základe tabuľky som sa rozhodol pre variant číslo 3. Z oceľových dielov je najľahší a zároveň je dostatočne pevný, tiež je možné diel zakaliť. Variant z hliníku nie je možné použiť vôbec, keďže napätie na súčiastke je značne vyššie ako na medzi klzu materiálu (viď. kapitola nižšie), zároveň by určite došlo k odtlačeniu ihličiek ložiska do materiálu hnacieho kľbu. Ako materiál bol zvažovaný aj titán, ten je ľahký, no zároveň má výborne mechanické vlastnosti, avšak cena za materiál a obrábanie je niekoľkokrát vyššia ako u oceli, takisto by bolo nutné urobiť pokus, či nedôjde k odtlačeniu ihličiek do materiálu. Keďže by to prinieslo ďalšie komplikácie do vývoja súčasti, tento materiál bol zavrhnutý.

8 FEM analýza zvoleného hnacieho kľbu

Analýzu som robil na samotnej oceľovej koncovke, ktorú chcem vyšetrovať tak, akoby došlo k maximálnemu krútiacemu momentu iba na nej. Keďže na vyšetrenie celej zostavy by bolo potrebné vytvoriť materiálový model samotnej kompozitnej rúrky a lepeného spoja, čo zahŕňa lamináciu testovacích vzorkov a ďalšie materiálové testy. Z toho dôvodu som sa rozhodol, že samotná analýza bude na súčiastke a lepený spoj s kompozitnou trúbkou otestujem na testovacej stolici na statický krut, v spolupráci s firmou TATRA.

Statických analýz som spravil niekoľko než som došiel k finálnej verzii. Vďaka tomu som odladil sieťovanie modelu, materiál a rozmery vrubov. Na analýzu som použil softvér ANSYS R1 2019.

Voľba materiálu

Po prvotných analýzach a priebehu napätia som zistil, že budú veľmi vysoké napätia na vrube, čo je o takto namáhanej súčiastky pravdepodobné. Materiál som vyberal podľa niekoľkých kritérií a to vysoké R_e , možnosť tepelného spracovania a vhodný na dynamické namáhanie.

Materiál	R_m	R_e	σ_c	σ_{Co}	τ_c	
11 373.1	445	247		199	126	
11 458.1	495	342		248	140	
11 523.1	557	363		272	138	
12 030.6	573	425	210	290	162	
12 040.6	626	449	222	300	171	
12 060.6	723	555	307	350	231	
12 061.6	881	592	328	390	243	
14.140.7	984	859	362	398	260	
14 260.7	1509	1328	521	620	360	
14 331.7	1139	953	384	457	269	
15 241.7	1185	1067	437	477	279	
16 341.7	1592	1430	669		352	
422643.1	500	340	185		145	
422653.1	565	380	190		150	

Obrázok 29 - Základné medze únavy niektorých konštrukčných materiálov [21]

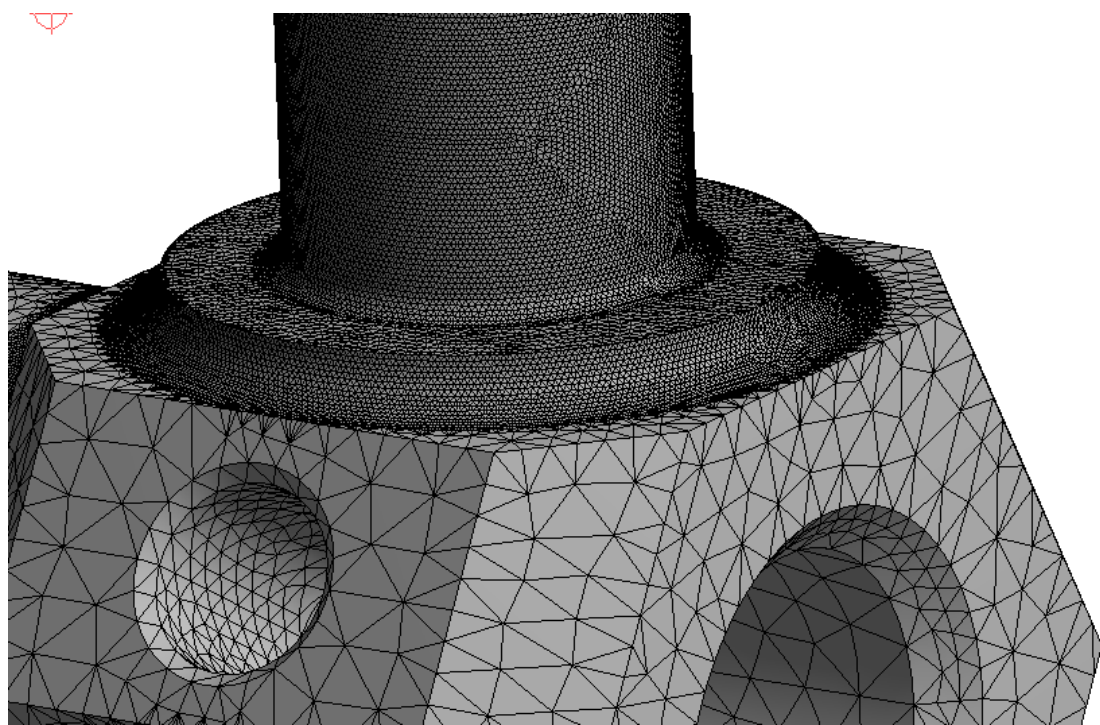
Na základe tabuľky materiálov som sa rozhodol pre dva varianty a to 14 260.7 a 15 241.7, oba materiály sú .7 a teda zušľachtené na strednú pevnosť. Oba materiály sa používajú na súčiastky vozidiel, ako napr. ozubené kolesá, torzné tyče, namáhané pružiny. Po celkovom zvážení som sa rozhodol pre materiál 15 241.7, ktorý je odolnejší voči korózií,

jeho vlastnosti sú dostačujúce, a teda z ekonomického hľadiska nie je nutné použiť tak vysoko pevný materiál ako 14 260.7.

Príprava geometrie, sieť

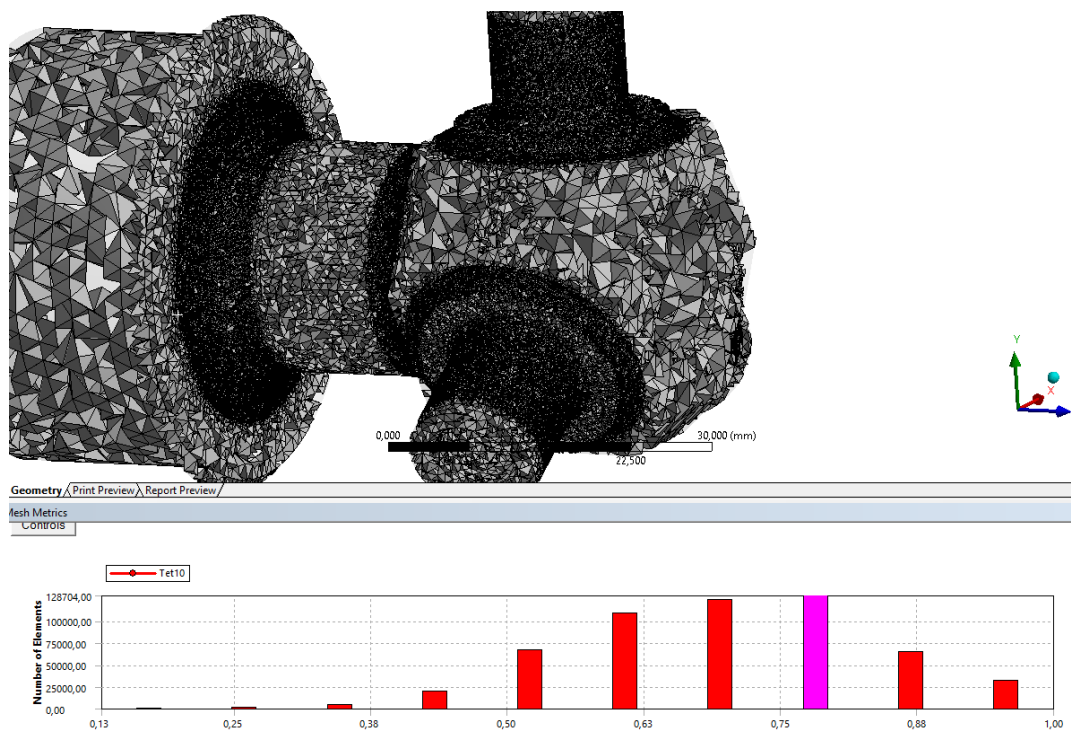
Pretože sa jedná o pomerne malú súčiastku, ktorej výpočet nie je tak zdĺhavý, nebolo potrebné zjednodušovať geometriu, a teda odstraňovať napríklad drážky pre poistné krúžky alebo zrazenia.

Na súčiastku som použil sieť veľkosti 1 mm. Na samotných priemeroch, kde nepredpokladám veľkú koncentráciu napätia, som sa rozhodol použiť funkciu facemeshing na zníženie počtu elementov. Čo sa týka samotných vrubov, tam som použil tak isto funkciu facemashing kvôli zvýšeniu kvality a pravidelnosti siete. Postupne som ladil veľkosť na vruboch, kým som nedostal stálu hodnotu vzniknutého napätia. Veľkosť prvkov na vrube je 0,2mm. Počet elementov je 183 537 a uzlov 315 411.



Obrázok 30 - Sieťovanie modelu

Rovnako som sa zameral aj na kvalitu siete, ktorá sa v programe hodnotí od 0 – 1, pričom som sa snažil dostať na odporúčanú hodnotu 0,7. Nižšia kvalita siete sa prejavila iba na čapoch tripodu, to vzniklo zmenšením siete na vrube a prechodom elementov do plochy čapu, preto som zvolil výslednú kvalitu siete ako vhodnú.

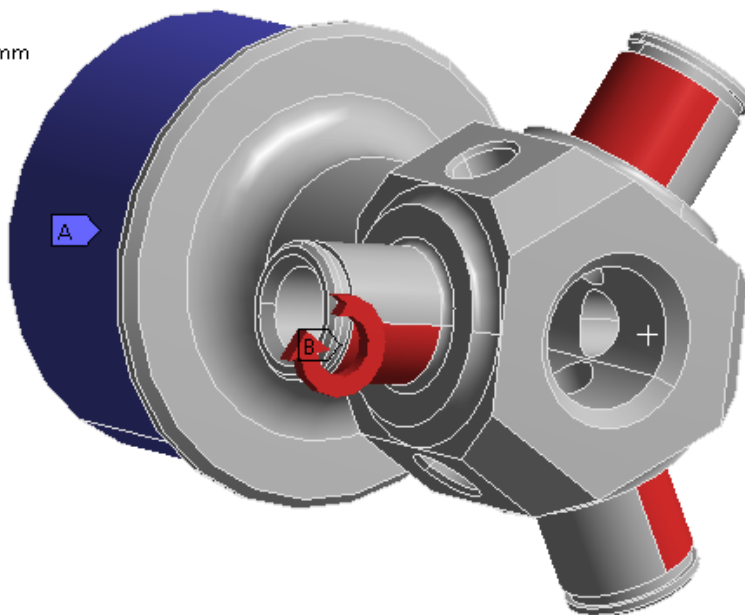


Obrázok 31 - Kvalita siete

Okrajové podmienky

Keďže vyšetrujem iba oceľovú súčiastku, zvolil som okrajové podmienky, čo najbližšie reálnej situácii a to fixed support na plochu, ktorá bude vlepená a moment voči polovičnej ploche čapu, teda akoby pôsobil moment od ložísk.

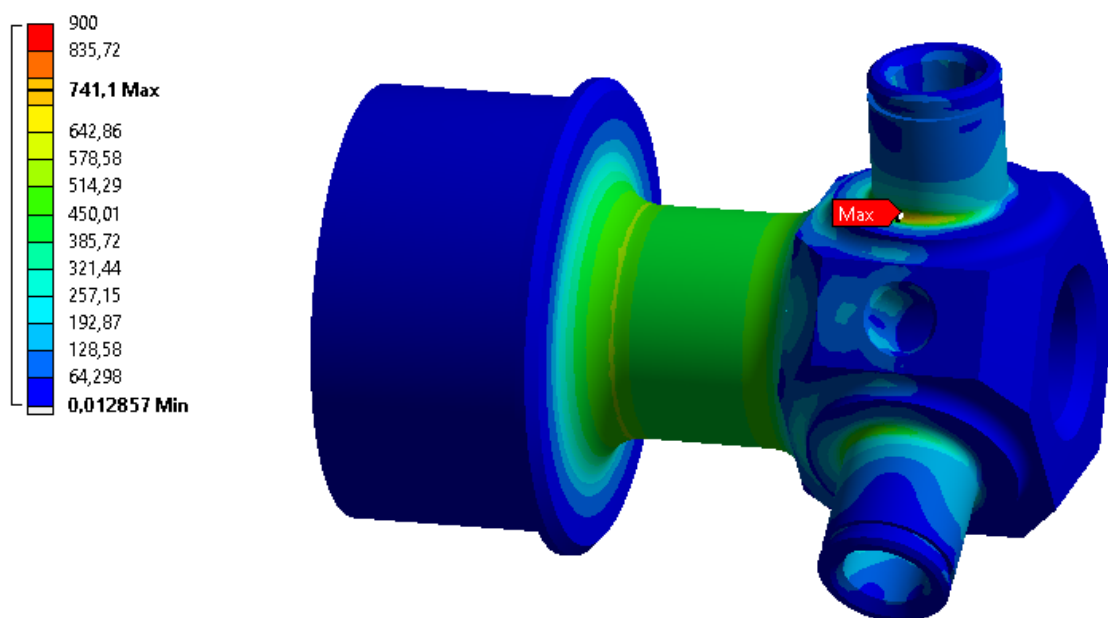
- A** Fixed Support
- B** Moment: $4,15e+005$ N·mm



Obrázok 32 - Okrajové podmienky

Výsledky

Ako som predpokladal, najvyššie napätie vzniklo na vrube s najvyšším napätím 741,1 MPa, to je však značne pod medzou klzu zvoleného materiálu, okolné napätie vrubu klesá na hodnotu 400 MPa. Vďaka simulácii som tiež navrhol všetky diery slúžiace na odľahčenie a dostal som sa s výslednou hmotnosťou na 260 g. Pričom návrh volím ako vyhovujúci .



Obrázok 33 - Priebeh napätia na súčiastke

9 Návrh testovacieho prípravku, statická skúška

Kompozitné hriadele sú zložené súčiastky, ktorých zlyhanie môže spôsobiť množstvo premenných. Najkritickejšou súčasťou návrhu je lepený spoj a bezpečnosť kompozitnej rúrky. Akákoľvek neistota v chovaní kompozitných materiálov vedie k nevyužitiu materiálových vlastností, preto je potom pri praktickom návrhu nutný vysoký koeficient bezpečnosti. [22]

Statická skúška bude teda prebiehať na kompozitnej rúrke, ktorá bude spojená s prípravkom lepeným spojom. Lepený spoj bude totožný ako na hnacom hriadeľi, pričom maximálny moment, ktorý by malo lepidlo preniesť bude:

$$M_{kl\ max} = \frac{\tau_{25} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D+d}{2}\right)^2 \cdot l}{2} = \frac{34,5\ MPa \cdot \pi \cdot \left(\frac{40.09\ mm + 39.97\ mm}{2}\right)^2 \cdot 24\ mm}{2} \\ = 2\ 083\ 592\ Nmm = 2\ 083,6\ Nm \quad (19)$$

Kde $M_{kl\ max}$ [Nm] je maximálny moment, ktoré lepidlo preniesie a τ_{25} [MPa] je pevnosť lepidla v strihu pri teplote 25°C.

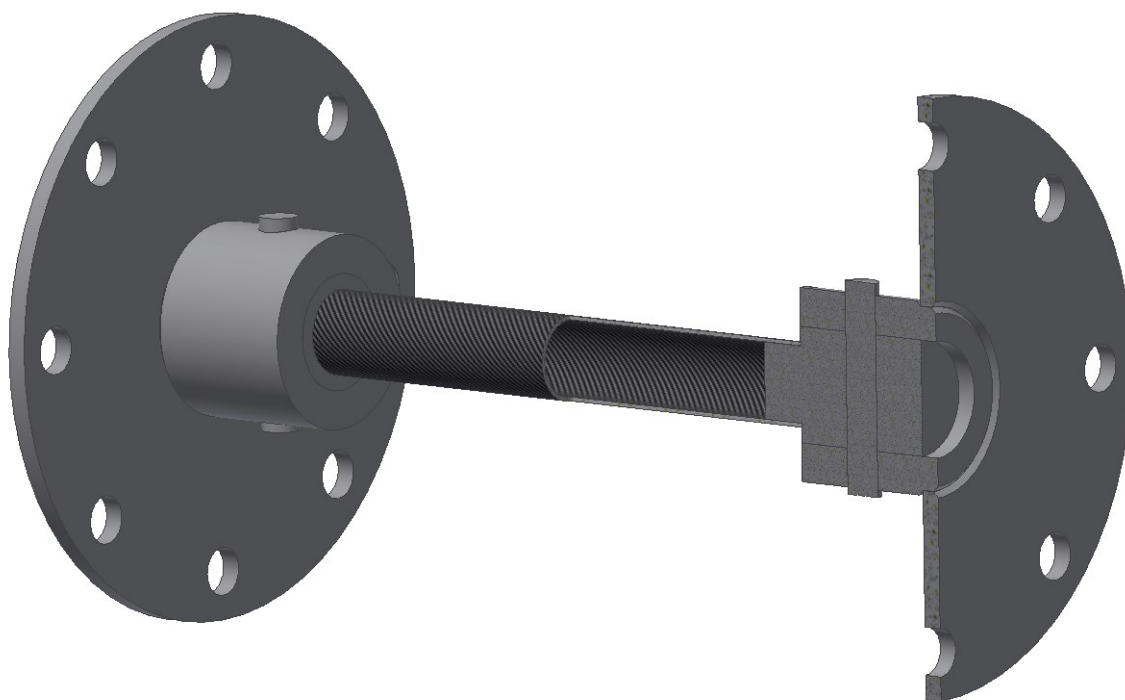
Maximálny vypočítaný moment prenesený pneumatikou je 415 Nm. Aby boli vyrobené diely dostatočne bezpečné a mohli sa používať na novom monoposte rozhodol som sa, že musia pri teste dosiahnuť minimálnu hodnotu bezpečnosti 4, teda minimálny testovací moment bude 1 660 Nm. Vzhľadom na vysokú hodnotu momentu, testovanie bude prebiehať so spoločnosťou Tatra Kopřivnice, ktorá disponuje testovacím zariadením na krut s maximálnym zaťažovacím momentom 16 000 Nm.

Návrh testovacieho prípravku spočíval v konzultáciách so spoločnosťou a podliehal požiadavkám a rozmerom testovacieho zariadenia. Jedná sa o zvarenec príruby s nábojom, do ktorého sa bude vsúvať rúra s nalepeným valcovým koncom. Súčiastky budú poistené proti pretočeniu pomocou kolíka. Prípravok som navrhoval, aby bol ekonomicky čo najlacnejší, keďže sa jedná o statickú skúšku.



Obrázok 34 - Testovací prípravok

Z dôvodu vírusu COVID-19 a prísnych opatrení spojených s pandémiou, žiaľ nebolo možné meranie uskutočniť.



Obrázok 35 Model zostavy testovacieho prípravku INVENTOR 2019

10 Manžety

Aby bol zabezpečený bezproblémový chod hnacích hriadeľov, tripoidný kĺb musí byť dostatočne mazaný plastickým mazivom, do ktorého zároveň nesmú prenikať nečistoty. Keďže sa jedná o návrh súčiastky závodného vozu, nemala by chýbať žiadna súčasť. Problémom však je, že kvôli veľkému priemeru hriadeľov nie je možné nájsť na trhu vhodné manžety. Rozhodol som sa teda pre variantu vyrábanú pomocou metódy 3D tlače z materiálu TPU, plast ktorý je veľmi pružný, no zároveň odolný, čo sú vhodné vlastnosti pre manžety hnacích hriadeľov. Toto riešenie zabezpečí jednoduchú údržbu, pretože v prípade poškodenia manžety sa jednoducho vytlačí nová a nahradí.



Obrázok 36 Manžeta - 3D tlač

Zhodnotenie výsledkov

Finálny návrh nového riešenia hnacích hriadeľov podliehal množstvu kritérií. Počínajúc od zástavových rozmerov, uhlom natočeniam a mnohými ďalšími. Keďže sa jedná o návrh pre závodné vozidlo, dôležitú rolu v návrhu zohráva nízka hmotnosť a optimálna pevnosť. Z tohto dôvodu bol od začiatku zvolený materiál hriadele uhlíkový kompozit. Na trhu je množstvo firiem ponúkajúcich kompozitné polotovary alebo zákazkovú výrobu na mieru. Zároveň je možnosť pri návrhu hnacieho hriadeľa vyrobiť vlastný variant. Z dôvodu spolupráce s firmou Brebeck Composite, ktorá tímu ochotne pomáha s výrobou kompozitných dielov, bolo zaujímavejšie riešenie vyrobiť vlastnú trúbku. Toto rozhodnutie padlo na základe dvoch dôvodov a to, získania viac skúsenosti s návrhom a výrobou kompozitných dielov, zároveň je tiež výhoda originálneho dizajnu dielu. Výpočtový model rúrky riešil ako diplomovú prácu študent piateho ročníka, oboru aplikovaná mechanika, keďže moja práca sa zaoberá samotným konštrukčným riešením hnacieho hriadeľa.

Hnacie kľby a ich návrh tvorilo niekoľko variant. Prvotne návrhy prebiehali z viacerých materiálov ako hliník, titán, oceľ. Ako bolo opísané v kapitole 7 finálna verzia je z ocele, to prinieslo vyššiu hmotnosť koncovky, no zároveň je súčiastka ekonomickejšia na výrobu. Pri samotnom návrhu oceľovej koncovky bolo zvažované viaceré množstvo prechodových rádiusov a geometrií súčiastok, až bol zvolený optimálny variant v pomere hmotnosti a napätia, ktoré sa podľa simulácie vyskytuje na súčiastke.

Návrh lepeného spoja spočíval najmä vo výbere optimálneho lepidla, keďže na lepidlo sú kladené veľmi vysoké nároky, a to nielen vo forme zaťažovania, ale zároveň aj v zmene teploty. Výber lepidla spočíval v prieskume trhu, skúsenosti firiem a iných tímov.

Práca sa tiež zaoberá samotným testovaním kompozitnej rúrky a overenie správnosti výpočtu lepeného spoja, žiaľ z dôvodu prísnych opatrení spojených s vírusom COVID-19, nebolo možné toto meranie vykonať a otestovať tak výsledný návrh.



Obrázok 37 - Zostava hnacieho hriadeľa Vector06 program INVENTOR2019

Návrh hriadeľa bol vypracovaný s ohľadom na všetky faktory, ktoré naň pôsobia, pričom jednu z najdôležitejších úloh zohrala hmotnosť. V motoršporte hrá totižto veľkú rolu, a preto bolo mojim nepísaným cieľom ušetriť najmenej 500 g hmotnosti. Hmotnosť jednotlivých komponentov popisuje tabuľka 4. Ložiská použité v tabuľke však nie sú od značky RCV, ktoré boli použité na návrh a na vozidle Vector05, ale je to ich ekvivalent značky Spidan. Pričom výsledná hmotnosť oboch hriadeľov v porovnaní s hriadeľmi vozidla Vector05 je o 553 g nižšia, čo považujem za výborný výsledok.

Tabuľka 4 - Hmotnosť a porovnanie hnacích hriadeľov

	Hriadeľ 17''	Hriadeľ 16,7''
Kompozitná rúrka	109 g	105 g
Oceľová koncovka (2ks)	520 g	
Ložiská (6ks)	108 g	
Lepidlo	10 g	
Poistné krúžky (6ks)	6 g	
Celková hmotnosť	753 g	749 g
Hriadele Vector05	1 033g	1 022g
Rozdiel V05 a V06	280 g	273 g
Celkovo úspora hmotnosti	553 g	

Literatúra

- [1] FS CZECH. <https://www.fsczech.cz/> [online]. Dostupné z: <https://fsczech.smugmug.com/Photo/2019/Friday/i-bWZLHWQ/A>
- [2] Pravidla Formula SAE, verzia 25.07.2019 [online]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/>
- [3] VLK, F. Převody motorových vozidel. Nakladatelství VLK, Brno 2006. ISBN 80-239-6463-1
- [4] North West Propshafts. [online]. Dostupné z: <http://www.northwestpropshafts.com/blog/what-makes-up-a-propshaft>
- [5] RCVPERFORMANCE. [online]. Dostupné z: https://www.rcvperformance.com/media/fsae/FSAE_Brochure.pdf?fbclid=IwAR0o3mDcA5Nk2CxH2t-8QJtwrUnGJKueguj6A2OsvOqSYcJXnA0isjnwORU
- [6] Markwilliams. [online]. Dostupné z: <https://www.markwilliams.com/driveshaft-criteria.html>
- [7] DRAGZINE. [online]. Dostupné z: <https://www.dragzine.com/tech-stories/driveshaft-technology-and-selecting-the-proper-shaft-for-your-ride/>
- [8] LESLIE J. , and ccollective. Composite Driveshaft s: Technology and experience. Copyright 1996 society of automotive engineers. [online]. Dostupné z: http://www.acpt.com/Resources/Documents/SAE_1966.pdf
- [9] RCVPERFORMANCE. [online]. Dostupné z: <https://www.rcvperformance.com/rcv-ultimate-carbon-fiber-cv-prop-shaft-for-polaris-turbo-16-2-seat.html>
- [10] Autoride. [online]. Dostupné z: <https://autoride.sk/homokineticky-klb-funkcia-skratke>
- [11] SOSSKyjov. [online]. Dostupné z: http://www.sossoukyjov.cz/data/File/Klouby_a_kloubove_hridele.pdf
- [12] Seherr-Thoss, H. Schmelz, F. Aucktor, E. Universal Joints and Driveshafts. Springer, Berlin 2006. ISBN-10 3-540-30169-0. [online]. Dostupné z: https://books.google.sk/books?id=GPdmft_cpKQC&pg=PA19&lpg=PA19&dq=bendix+weiss+joint+fsae&source=bl&ots=zrUsUO-HlQ&sig=ACfU3U1KRXBU--Bf9Yaoqk9JxoY8udhTvA&hl=sk&sa=X&ved=2ahUKEwi0wpGCn6noAhUYM8AKHUH3AtcQ6AEwEnoECAkQAQ#v=onepage&q=bendix%20weiss&f=false
- [13] Autozone. [online]. Dostupné z: <https://www.autozone.com/repairguides/Chrysler-Front-Wheel-Drive-Cars-4-CYL->

1981-1995-Repair-Information/MANUAL-TRANSAXLE/Halfshafts/_/P-0900c15280251d5e

[14] KRIZBERGS, J. GUTAKOVSKIS, V. Kompozitné materiály. [online]. Dostupné z: <https://zep.sk/wp-content/uploads/2017/11/SKILLM21.pdf>

[15] KROPÍK, B. Návrh a analýza kompozitní trůbky pro poloosu studentské formule, ČVUT, Praha, Bakalárska práca 2015

[16] GURIT. [online]. Dostupné z: <https://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials/Adhesive-Systems>

[17] 3M. [online]. Dostupné z: <https://multimedia.3m.com/mws/media/8209350/3m-scotch-weld-9323-b-a.pdf>

[18] Loctite. [online]. Dostupné z: <https://kayden.com/technical-data-sheet/loctite-ea-9394-c-2-aero-technical-data-sheet/>

[19] BARTOŠKA, V. Kompozitní hnací hřídele Formule student, VUT, Brno, Bakalárska práca 2018

[20] KALÁB Květoslav. [I]Části a mechanismy strojů pro bakaláře: části spojovací[I]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, 90 s. ISBN 978-80-248-1290-8

[21] PRÁŠIK, L. Únava materiálu strojních součástí při periodickém zatežování. [online]. Dostupné z: http://www.kst.tul.cz/podklady/casti_fs/podklady/Unava_materialu_strojnich_soucasti_pri_periodickem_zatezovani.pdf?fbclid=IwAR0eCBS4VcSwxlC2QcH2CIRmsSkaJ26Uafcb033cd7OsJzd2edHytcJ1NCw

[22] MACHEK, V. SODOMKA, J. Polymery a kompozity s polymerní matricí. Nakladatelství ČVUT, Praha 2008. ISBN 978-80-01-03927-4